第 64 卷 第 3 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 3
2023 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.03.003

磁云传播的动力学演化过程研究进展*

冯恒强† 赵 岩 王杰敏

(洛阳师范学院空间物理研究所 洛阳 471022)

摘要 磁云因其独特的磁场结构经常是重大灾害性空间天气的驱动源. 近来从磁云的边界层结构、环向通量、大尺度结构等方面关于磁云传播的动力学演化过程的研究取得了一些进展. 在磁云边界存在一个由于磁场重联而形成的边界层结构. 在磁云传播过程中, 这种发生在边界处的磁场重联可能会把磁云的磁场剥蚀掉, 进而引起其磁通量绳结构环向通量的减少以及不对称. 在磁云内部, 经常会观测到多个子通量绳结构. 这些特性各异的子通量绳可以通过磁场重联而合并, 进而引起磁云磁结构的改变. 关于磁云大尺度磁场拓扑位形的演化机制, 除了较早提出的交换重联外, 目前的研究表明在行星际空间中, 磁云边界处的重联过程也可以将磁云闭合或半开放的磁场线打开或断开. 尽管在相关研究中已经取得了较大进展, 但关于磁云传播的动力学演化过程还有许多问题尚不清楚. 在行星际小尺度磁通量绳边界也发现了边界层结构, 那么磁云是否会因剥蚀而成为小尺度通量绳? 磁云内子通量绳结构在相互作用中会不会引起某些不稳定性而导致整个通量绳系统的崩溃? 这些问题的解决还有待于进一步的理论、观测和数值模拟研究.

关键词 日冕物质抛射, 太阳风, 磁场重联

中图分类号: P185; **文献标识码**: A

1 引言

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是太阳大气中一种剧烈的大尺度爆发现象, 是指在短时间内从日冕向外抛射出大量的等离子体和磁场进入行星际空间. CME传到地球附近经常被卫星观测到, 被称为行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME)[1–3]. CME在行星际空间和太阳风流相互作用的过程中会产生各种等离子体扰动和结构, 为等离子体物理过程和现象的研究提供了在地面实验室难以实现的实验环境. 由于CME在太阳上爆发时往往呈现螺旋状结构, 它们通常被认为在太阳附近具有封闭的磁通量绳结构[4–6]. 另外, 所有研究CME爆发机制和传播演化的模型都假设CME具有磁通量绳结构[7–15]. 然而, 在1 AU附近卫星的观测资料却显示仅有约30%的ICME具有磁通量绳结构[16]. Burlaga等[1]最早引入“磁云”来描述具有磁通量绳结构的ICME, 并经验地定义磁云应具有以下3个观测特征: (1)磁场方向在长时间内发生大角度光滑旋转; (2)具有相对较强的磁场; (3)相对较低的质子温度. 目前通常将磁云等同于具有磁通量绳结构的ICME. 由于磁云的螺旋磁结构能够持续稳定地提供南向磁场, 到达地球附近的磁云可以和地球磁层发生相互作用, 使地球磁层的磁场形态、结构和

2022-09-01收到原稿, 2022-10-28收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41974197、42104158)资助

†fenghq9921@163.com

动力学过程发生激变, 进而产生磁暴、电离层暴、热层暴和粒子暴等灾害性空间天气事件, 给人类航天、通信、导航、跟踪、定位、电力、资源勘探以及国家安全等领域带来重大的影响和损失[7–21]. 所以无论从科学探索上还是应用需求上, 对磁云的研究都十分重要.

磁云作为ICME的子集, 往往会引起剧烈的地磁活动, 为了能准确地预测CME对空间环境的影响, 对磁云在行星际空间的传播及其动力学演化研究尤其重要. 如作为磁通量绳的磁云是如何和背景太阳风发生相互作用的? 在相互作用过程中边界是如何演化的? 磁云在传播过程中随着边界的演化, 其磁通量绳结构的环向磁通量是否会发生变化, 如何变化? 磁云作为两端连接到太阳上的磁通量绳在传播过程中是如何与太阳大气断开的? 磁云内部子结构之间是否会发生相互作用? 有很多研究者认为所有ICME都具有磁通量绳结构, 或者至少在CME爆发的时候具有通量绳结构[22–26], 那么非磁云的ICME是否是磁云演化的结果? 本文将重点介绍和这些问题相关的磁云传播及其动力学演化研究进展, 并就相关问题进行讨论.

2 磁云边界的演化

磁云作为CME从日冕内抛射出来之后, 在行星际空间传播过程中一定会和背景太阳风发生相互作用. 相互作用过程主要包括挤压和磁场重联, 挤压同时可能促进磁场重联的发生. 磁云和背景太阳风之间的相互挤压在前后边界都很常见. 几乎所有磁云前后边界附近都有挤压的痕迹, 如在磁云内部靠近边界处的磁场强度、质子密度、温度的增强等. 然而, 磁云和背景太阳风之间的相互挤压作用不会破坏其磁通量绳的结构, 只能使磁通量绳的形状发生变化[23]. 而发生在磁云边界附近的磁场重联则会对整体磁通量绳结构进行剥蚀, 甚至破坏整个磁通量绳结构. 由于磁云的通量绳结构会通过磁场重联被剥蚀, 那么磁云的边界应该是动态演化的. 这个演化过程将影响磁云和地球磁层相互作用的过程, 即会影响在两者相互作用过程中能量、动量和质量的传输及其相应地磁活动. 魏奉思等[27]通过对在文献中报道过的70个磁云边界附近的参数, 如温度、密度和等离子体β值(等离子体热压和磁压的比值)等, 进行统计分析, 提出磁云边界存在边界层结构的结论. 磁云边界层是磁云在日地空间的传播过程中和背景介质发生磁场重联而形成的.

Gosling等[28]于2005年基于磁场重联模型给出了行星际磁场重联出流的判据. 随后, 很多磁云边界层内的磁场重联出流事件被报道[29–30]. 这些观测证据揭示了磁云边界层的形成机制. 磁云边界层的定义本身就意味着磁云边界不是一成不变的, 而是随着其在行星际空间传播而演化, 因而也是一个动态结构. 那么在其传播过程中, 磁云和背景风磁场之间发生重联的决定性条件是什么? 磁重联过程又会持续多久, 是不是稳态的? 这不仅仅是磁云边界的演化问题, 还涉及到整个磁云的动力学演化. 魏奉思等[27]曾经提到, 磁云边界附近的磁重联会把磁云外层的磁场逐渐"剥离", 即磁通量绳的磁通量将减少. 如果这个过程进行很快, 那么持续时间只有几个小时的小尺度行星际磁通量绳(文献中称为"小磁云")事件是不是磁云被"剥离"的证据? Feng等[31]通过对1996年Wind卫星的磁场和等离子体观测数据进行检查, 确认了21个小尺度行星际磁通量绳, 统计研究发现: 在这21个小尺度磁通量绳中都存在边界层结构. 这些边界层的时间分布为几分钟到半个小时之间, 它们内部具有高的质子温度和密度, 相对较高的等离子体β值. Feng等[31]还认证了多个发生在小磁通量绳边界附近的磁场重联出流事件. 这表明无论大尺度还是小尺度磁通量绳的边界附近都有磁场重联发生, 并且不是个别现象. 根据这些磁场重联出流和小通量绳的几何位置可判断这些小磁通量绳的磁通量正在被这些磁场重联消耗掉. 这些观测进一步表明磁云和小尺度磁通量在传播过程中其边界都处于发展演化的过程中. 这也间接说明1 AU附近观测到的小尺度磁通量不是起源于当地, 至少小尺度磁通量绳已经传播了相当长的一段时间. 至于磁云是否会逐渐被"剥离"成小尺度磁通量绳以及"剥离"的快慢, 很难通过单个事件去确定, 但是可以借助于其环向磁通量

的演化去估算, 接下来将具体介绍磁云的环向通量的演化.

3 磁云结构环向通量的演化

磁云边界附近磁场重联的持续或者间歇发生必将影响整个磁结构通量的变化, 至于磁云作为CME从日冕里抛出来到抵达1 AU附近, 其磁通量绳减少多少很难估计. 因为目前没有观测手段能够比较准确地估算其爆发时的磁通量. Ruffenach等[32]试图从磁云通量绳结构的环向通量不对称度出发来估算磁云环向通量的减少程度, 即判断磁云边界处磁场被剥蚀的程度. Ruffenach等[32]以2007年11月19–20日磁云为例, 估算其通量绳结构被剥蚀度高达44%–49%. 该磁云事件被ACE (Advanced Composition Explorer)、Wind、THEMIS (The Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms)、STEREO (Solar TErrestrial RElations Observatory) A、B这5颗卫星实地探测到. 图1来自于Ruffenach等[32]中的图3. 图中各量从上到下依次为超热电子投掷角分布图和归一化的超热电子投掷角分布图(图1 (f)和(g))、质子温度(红色曲线)和质子数密度(黑色曲线)(图1 (h))、太阳风速度(图1 (i))和磁场强度及3分量(图1 (j)). 由图1可以看出在19日17:15 UT (Universal Time)附近有一个磁云驱动的激波, 该处磁场强度、质子速度、质子温度都发生跳变急剧上升. 图中19日23:00 UT和靠近24:00 UT处的两条红色竖直虚线是Ruffenach等[32]给出的该磁云的两个可能的前边界, 最右边的竖直虚线是该磁云的后边界. 19日22:20 UT附近有一个磁场重联出流事件被观测到, 这里不再对这个重联出流事件进行详细的介绍, 具体信息可以参考文献[32]中的描述. 图2是Ruffenach等[32]给出的未被剥蚀磁云(图2 (a))和已经被剥蚀磁云(图2 (c))的理想磁场分量变化曲线(图2 (b)和2 (d)). 对于没有被剥蚀磁云(图2 (a)), 磁场环向分量By (蓝色曲线)对称于磁云中心. 从磁云的前边界开始对By分量进行积分计算环向磁通量, 累积所得环向磁通量(红色曲线)在磁云后边界处应该回到零. 如果一个磁云已经被侵蚀(图2 (c)), 那么其磁结构就不再是一个对称的磁通量绳, 从前边界到后边界对环向分量积分的结果就不再是零. 利用环向通量不对称度作为通量绳破坏程度的指标估算出该磁云被剥蚀度达44%–49%.

上述利用环向通量不对称度计算磁云剥蚀度的方法并不可靠. 首先, 大量观测资料显示磁云并不是一个理想轴对称的磁通量绳, 估算其轴向会出现较大误差. 即便是没有被剥蚀的磁云, 由于在传播过程中和背景太阳风的相互作用, 通常其前端会被压缩, 后端由于膨胀会被拉长, 估算其轴向仍然存在较大误差; 其次, Ruffenach等[32]只考虑了磁云前边界附近磁场重联事件的剥蚀, 而没有考虑磁云后边界附近的磁场重联的剥蚀. 假如一个磁通量绳前后边界受到同样程度的剥蚀, 则其环向通量不对称度仍然可为零. 目前报道的磁云(或行星际磁通量绳)边界附近的磁场重联事件多发生在后边界附近. 第1个报道行星际磁通量绳被磁场重联剥蚀的事件也是在后边界附近被剥蚀的[33]. 图3是Feng等[33]报道的一个和磁场重联出流相关的Wind卫星观测到的行星际磁通量绳事件, 即紧随1998年3月25日行星际磁通量绳事件后边界处有一个重联出流事件. 图中各量从上到下依次为: 磁场强度、磁场在GSE (the Geocentric Solar Ecliptic)坐标系中的3分量、太阳风质子速度和热速度、等离子体β值和质子数密度. 图3中用FB和RB标注的两条竖直线表示这个磁通量绳的前后边界, 紧随磁通量绳后面的阴影部分是一个磁场出流事件. 通过对该磁通量绳进行磁场拟合重构, 结合对周围磁场方向的分析, Feng等[33]给出了该磁通量绳正在被磁场重联剥蚀示意图(图4). 图4清楚地表明这个磁通量绳正在被后面的磁场重联剥蚀, 所以, 上述利用环向通量不对称度计算磁云剥蚀程度的方法是不可靠的. 后来, Ruffenach等[34]又对1 AU附近的50个磁云被剥蚀情况进行统计研究, 仍然采用环向通量不对称度来估算磁云被剥蚀的情况, 得出磁云平均被剥蚀程度为40%.

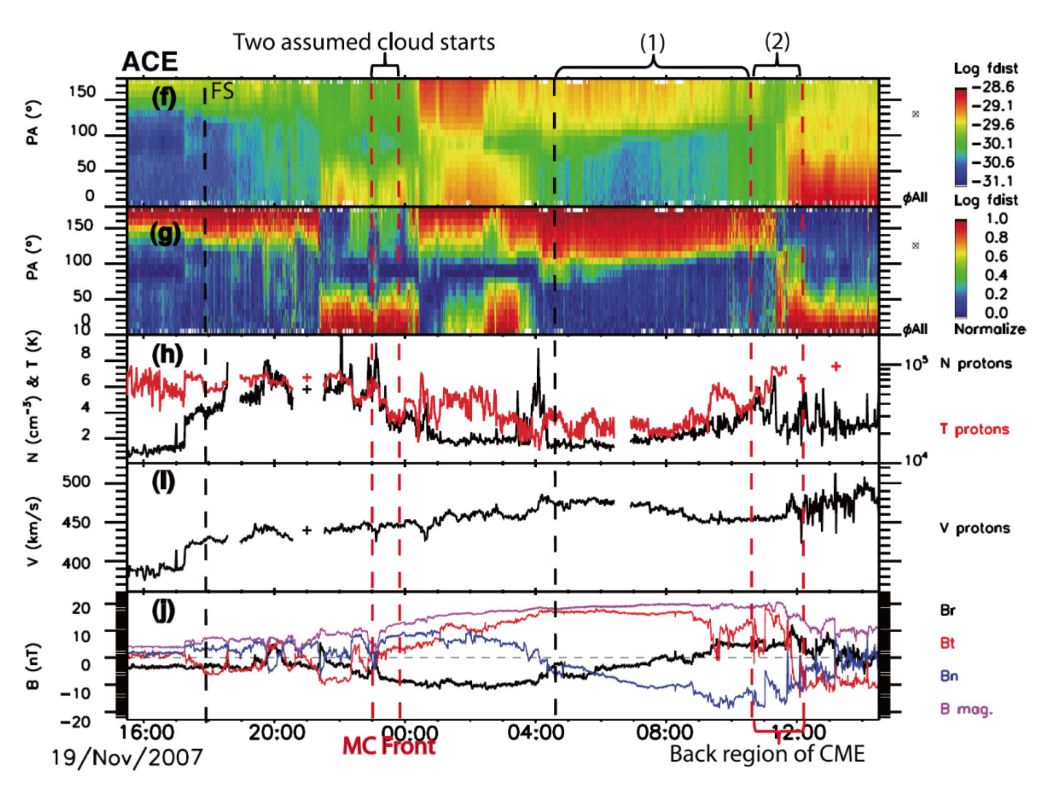


图 1 ACE卫星观测到的2007年11月19–20日磁云超热电子投掷角分布(PAD)、等离子体和磁场数据[32]

Fig. 1 The suprathermal electron PAD, plasma and magnetic field data from ACE from 19 Nov to 20 Nov, 2007[32]

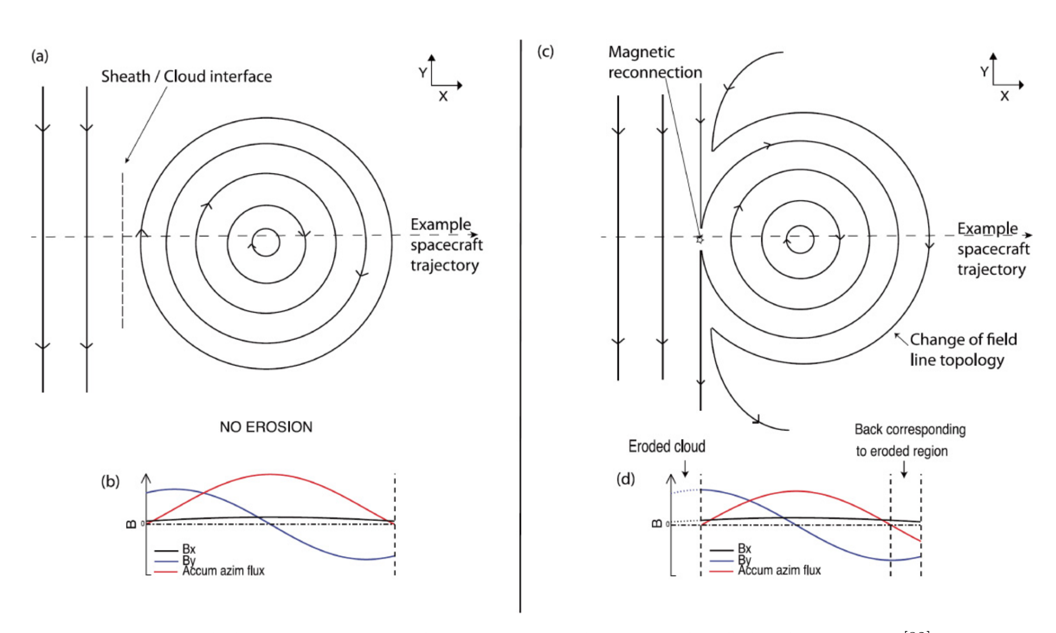


图 2 未被剥蚀磁云(a)和已经被剥蚀磁云(c)的理想磁场分量变化曲线示意图(b)和(d)[32]

Fig. 2 The illustration of the magnetic structure of (panel (a)) non-eroded and (panel (c)) eroded MCs (magnetic clouds) together with (panels (b) and (d)) the expected variations in the magnetic field components and accumulated azimuthal flux[32]

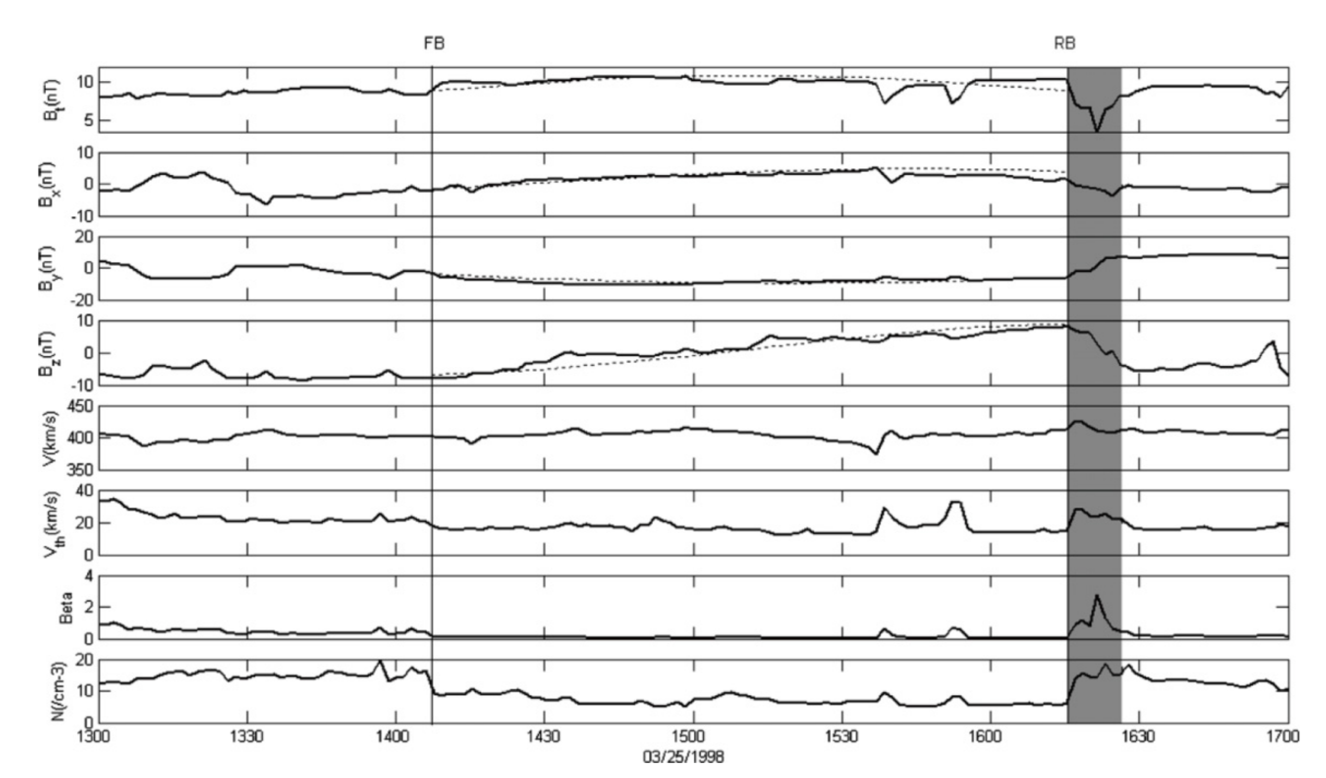


图 3 Wind卫星观测到的1998年3月25日行星际通量绳事件以及紧随的重联出流事件[33]

Fig. 3 An interplanetary magnetic flux rope and adjacent magnetic reconnection exhaust observed by the Wind spacecraft on 25 March, 1998[33]

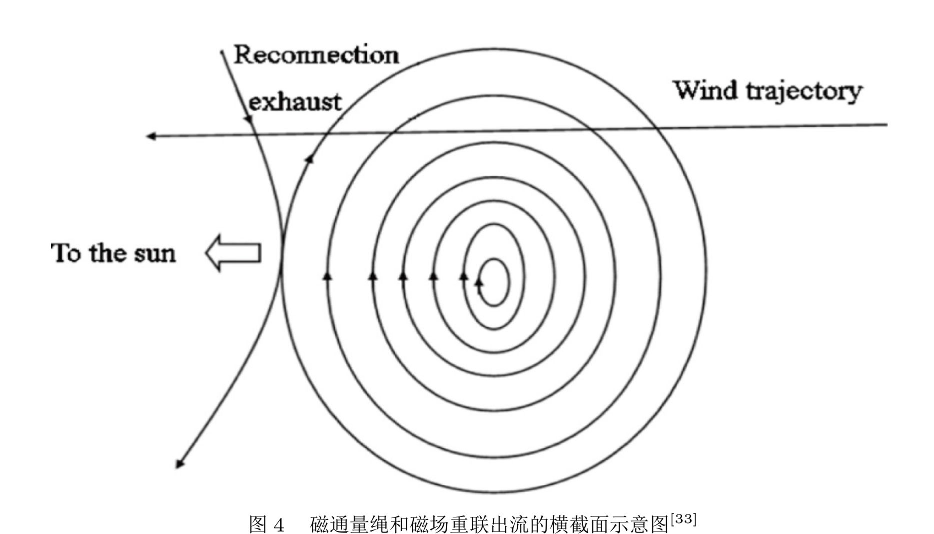


图 4 磁通量绳和磁场重联出流的横截面示意图[33]

Fig. 4 Sectional sketch of the flux rope and the reconnection exhaust[33]

最近, Zhao等[35]采用Crooker等[36]的事例列表, 从研究环向磁通量变化的角度出发研究了5 AU附近磁云的磁通量绳结构. 计算磁通量绳的环向通量首先需要确定其轴向, 通常认为磁云是一个二维、静态的磁结构. 对于这样的磁结构, 从G-S方程(Grad–Shafranov equation)可知, 沿着一条磁场线

热压和轴向磁场保持不变. 基于这样的性质, Zhao等[35]采用Hu等[37]的方法首先确定了磁云的轴向, 然后计算了沿轴向单位长度的环向通量. 具体的计算公式如下[38]

$$\frac{F_y(x)}{L} = \int_{x_1}^{x_2} B_{y,\mathrm{cloud}}(x')\,\mathrm{d}x' = \int_{t_1}^{t_2} B_{y,\mathrm{cloud}}(t')V_{x,\mathrm{cloud}}\,\mathrm{d}t' , \quad (1)$$

式中各项意义可参照图2, 假定通量绳轴向为z方向, x方向为在垂直轴的平面内卫星相对于磁云运动的方向. 式中$F_y(x)$为累积环向通量, y表示环向分量, L为通量绳沿轴向的长度, x_1、x_2分别为磁云的前后边界位置, t_1、t_2分别是磁云的前后边界时间, $B_{y,\mathrm{cloud}}$是磁场的环向分量(垂直于$V_{x,\mathrm{cloud}}$), $V_{x,\mathrm{cloud}}$是在垂直轴的平面内卫星横越磁云的速度, cloud表示磁云. 对于磁通量绳结构, 上式的值应该为零, 即环向通量是对称的. 通过计算, Zhao等[35]发现多数事例中环向通量在5 AU附近同样是不对称的, 而且不对称程度与Ruffenach等[34]在1 AU处的统计结果基本一致. 可见, 对于磁云环向通量不对称度在1 AU附近就开始保持基本不变, 所以用磁云环向通量不对称度估算磁云剥蚀程度不具有可参考性. 于是Zhao等[35]估算了5 AU处23个磁云除去不对称的部分, 即从通量绳边界到中心在单位长度上的环向磁通量, 得到的平均环向通量为2.42×10^{12} Wb/au. 同样, 利用Ruffenach等[34]的结果可以计算出在1 AU附近, 磁云的平均环向通量约为1.3×10^{13} Wb/au. 也就是说5 AU附近磁云通量绳结构的环向通量还不到1 AU处的20%. 这意味着磁云从1 AU 处向外传播的过程中, 其磁通量绳结构相当大的部分被剥蚀了.

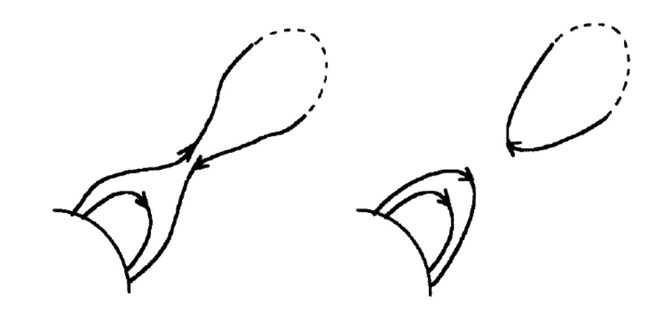
4 磁云大尺度磁结构的演化

磁云内的双向超热电子束流特征揭示了其大尺度磁通量绳结构的两端仍然连接在太阳上[39]. 如同前面所述, 通常认为所有CME在太阳附近都具有封闭的磁通量绳结构, 所有研究CME爆发机制和传播演化的模型也都假设CME具有磁通量绳结构. 那么, 具有封闭磁通量绳结构的磁云(或所有CME)不断从太阳抛向行星际空间的过程中, 日球层内的场强会持续增加, 最终导致日球层磁场强度灾难(magnetic field magnitude catastrophe)[40–42]. 当然事实并非如此, 磁通量绳的封闭结构最终会和太阳磁场完全断开. 如今磁通量绳的封闭结构和太阳磁场断开的过程仍然不是很清楚. 为了解决这个问题, Crooker等[42]建议磁通量绳的封闭磁结构可以通过图5所示的两个步骤和太阳磁场断开: (1)封闭的磁通量绳一端在太阳附近与周围从冕洞吹出的开放磁场发生交换重联而被打开; (2)随后磁通量绳的开放磁场在另一端和附近相反方向的开放磁场发生重联, 使整个磁通量绳和太阳磁场完全断开; 或者磁通量绳的开放磁场继续和附近的其他封闭磁场线发生交换重联. 所有Crooker等[42]建议的磁场重联都是在太阳附近发生的, 一些太阳附近的观测也证明了磁通量绳的一端可以在太阳附近通过重联被打开或者断开[43–46]. 如果真如Crooker等[42]建议那样, 磁云在传播过程中其内部和边界处的磁场重联将对整个演化不起任何作用. 但是, 大量观测证据表明在磁云边界附近常常探测到磁场重联事件, 很难想象这些磁场重联对磁通量绳的演化不起任何作用. 其实观测表明行星际磁场重联不仅可以改变行星际磁通量绳的位形进而影响其地磁效应, 还对磁通量绳的大结构演化有重要影响, 对解决日球层磁场强度无限增强灾难有着十分重要的作用. 下面将给出具体观测证据和解释.

图6给出了2002年2月2日00:00—09:00 UT区间内ACE卫星观测到的一个磁云的数据. 图的顶部是272 eV超热电子的投掷角分布图[47]. 蓝色和红色编码分别代表最小和最大电子通量. 接下来给出GSE坐标系中的磁场数据和质子速度, 质子密度和质子温度. 图6中两条垂直线表示磁云的前后边界. 由超热电子分布图可以看出, 双向电子流几乎存在于整个磁云期间, 这表明整个行星际磁通量绳的两端在1 AU处都连接太阳. 但是在磁云前端的00:38—01:35 UT之间, 没有观测到沿着磁场方向的超热电

子流. 这些观测结果表明, 在这个磁通量绳之前, 磁场线在大约1 h的间隔内是开放的, 即磁场线的一端已经和太阳断开. 由图6还可以看出: (1)磁场强度在磁通量绳前边界附近有一个明显下降区间; (2)在这个区间两端磁场方向发生反转; (3)质子密度和温度明显增强; (4)在x和z方向上可以观测到等离子体流速度明显增大. 所有的这些观测都是磁场重联出流的经典特征, 这个事件已经被Phan等人通过Walén关系确认为磁场重联出流[48]. 图7左图给出了这个磁重联事件的放大图. 图中从上到下依次为272 eV超热电子的投掷角分布图、磁场强度和3分量、等离子体流速度3分量、质子数密度和温度. 由图7可以看出反磁场方向的超热电子流在01:33 UT附近出现短暂的消失. 这意味着两条反向开放的场线重新连接, 产生和太阳断开的U形磁场线. 图7右图给出了ACE卫星轨道和磁通量绳和周围磁场拓扑分布示意图. 在磁场重联出流前呈现单向超热电子表明该时间段的磁场线被打开并且反向的开放场线可能来自磁通量绳的前部. 由图7可以看出, 最初磁通量绳的前部磁场线一端通过发生在太阳附近的交换重联被打开, 然后通过行星际空间中的磁场重联断开了开放的场线. 其次, ACE观测结果还显示, 磁通量绳前边界之前和重联出流之后的磁场线全部打开, 而后续磁通量绳的磁场线则闭合. 这表明, 磁通量绳之前的开放场线与其闭合的场线重新连接造成了这些磁场线被打开. 这些观测表明, 磁通量绳的闭合磁场线不仅可以通过太阳附近的交换重联打开, 而且还可以通过行星际磁重联打开.

图8给出了2001年10月31日至2001年11月1日期间Wind卫星观测到磁云的超热电子分布、磁场和等离子体数据[49]. 图的顶部是264.8 eV超热电子的投掷角分布图, 超热电子的角度和时间分辨率分别为22.5°和100 s. 图中蓝色和红色编码分别代表最小和最大电子通量. 接下来给出GSE坐标系中的磁场数据和质子速度, 质子密度和质子温度. 图中两条垂直线表示行星际磁通量绳的前后边界. 由超热电子投掷角分布可知: (1)平行磁场方向的超热电子流在整个行星际磁通量绳的持续时间内都存在; (2)从2001年11月1日15:30 UT到行星际磁通量绳的后边界不存在反平行磁场方向的超热电子流; (3)反平行磁场方向的超热电子流从行星际磁通量绳后边界一直持续到11月1日19:30 UT; (4)行星际磁通量绳后不再有平行磁场方向的超热电子束流. 由于超热电子束流来源于太阳, 所以这些观察结果表明: (1)从行星际磁通量绳前边界到11月1日15:30 UT的磁场线的两端仍然与太阳相连; (2)行星际磁通量绳的其他磁场线仅在平行磁场一端连接太阳; (3)并且从行星际磁通量绳后边界到19:30 UT的磁场线也仅在反平行端连接太阳. 另外, 在这个行星际磁通量绳后边界处有一个磁场重联事件正在发生, 我们将在下面详细讨论这个磁场重联事件对这个行星际磁通量绳演化的影响.



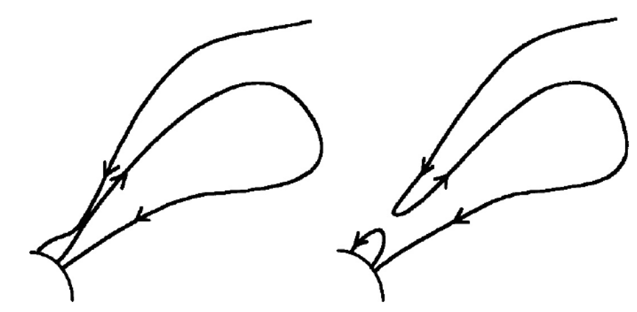


图 5 磁通量绳和太阳磁场断开过程的示意图[42]

Fig. 5 The illustration of disconnection of magnetic flux rope from the Sun[42]

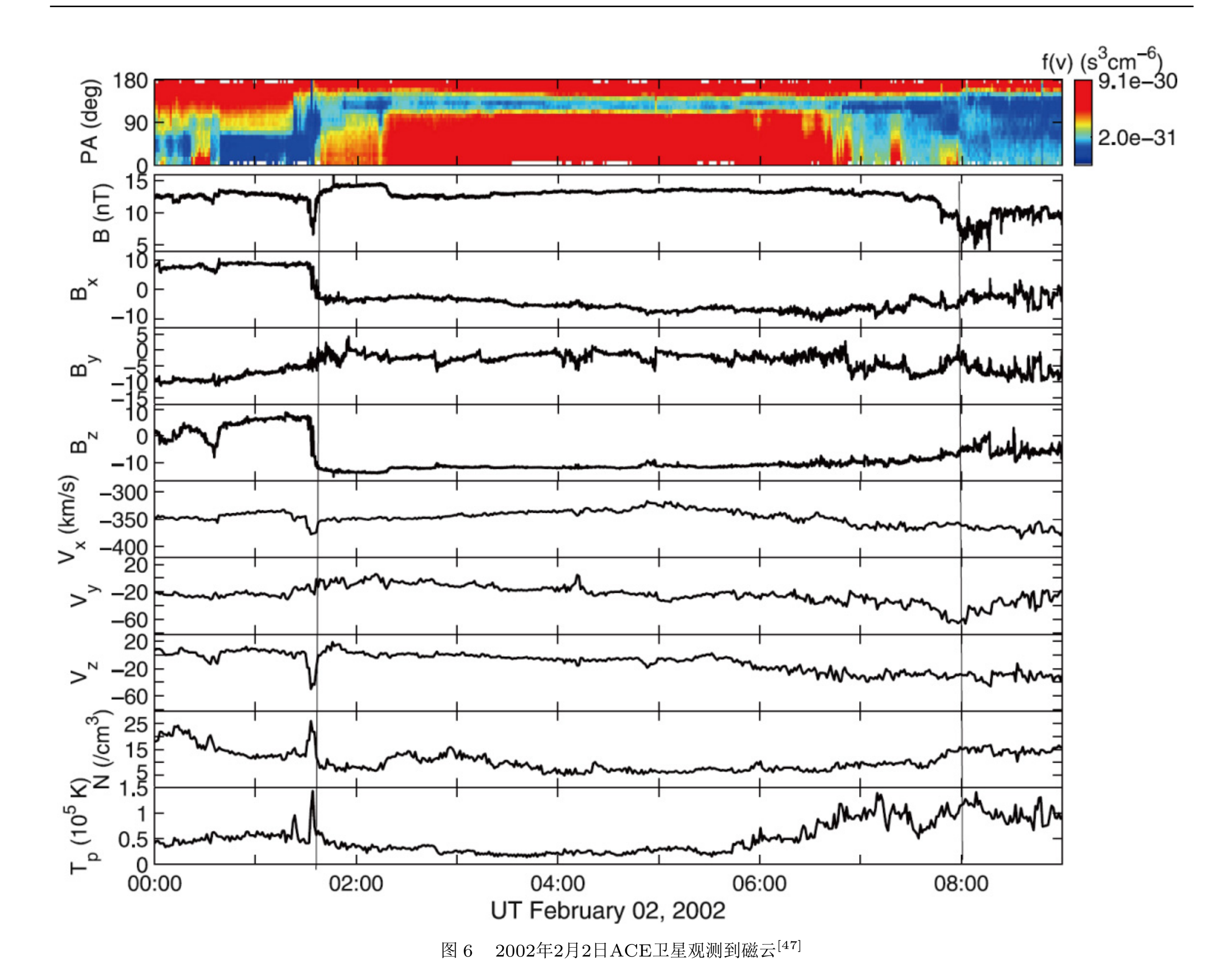


图 6 2002年2月2日ACE卫星观测到磁云[47]

Fig. 6 The magnetic cloud observed by ACE on 2 February, 2002[47]

图9给出了这个行星际磁通量绳后边界2001年11月1日17:59 UT附近磁场重联出流的细节图. 图中有一个明显的沿着z方向的加速流, 在加速流的两侧磁场方向发生反转, 速度分量和磁场分量在前边界附近反相关, 后边界附近正相关. 这些观测特征都表明这是一个重联出流事件, Feng等[49]还用Walén关系进行了验证, 预测的速度曲线与观察到的速度曲线能很好地对应. 图9中的超热电子分布图显示, 在磁场重联出流中既没有平行方向的超热电子束流也没有反平行方向的超热电子束流; 在磁场重联出流前后分别只有平行方向的超热电子束流和反平行超热电子束流. 这些观测结果表明两侧的开放磁场线通过磁重联事件重新连接, 产生了与太阳断开的U形场线. 因此, 这个行星际磁通量绳的一些半开放的磁场线正在因磁重联事件断开. 所以, 磁通量绳的演化是一个混合过程, 即磁通量绳的闭合场线可以在太阳附近或在行星际空间中同时打开或断开.

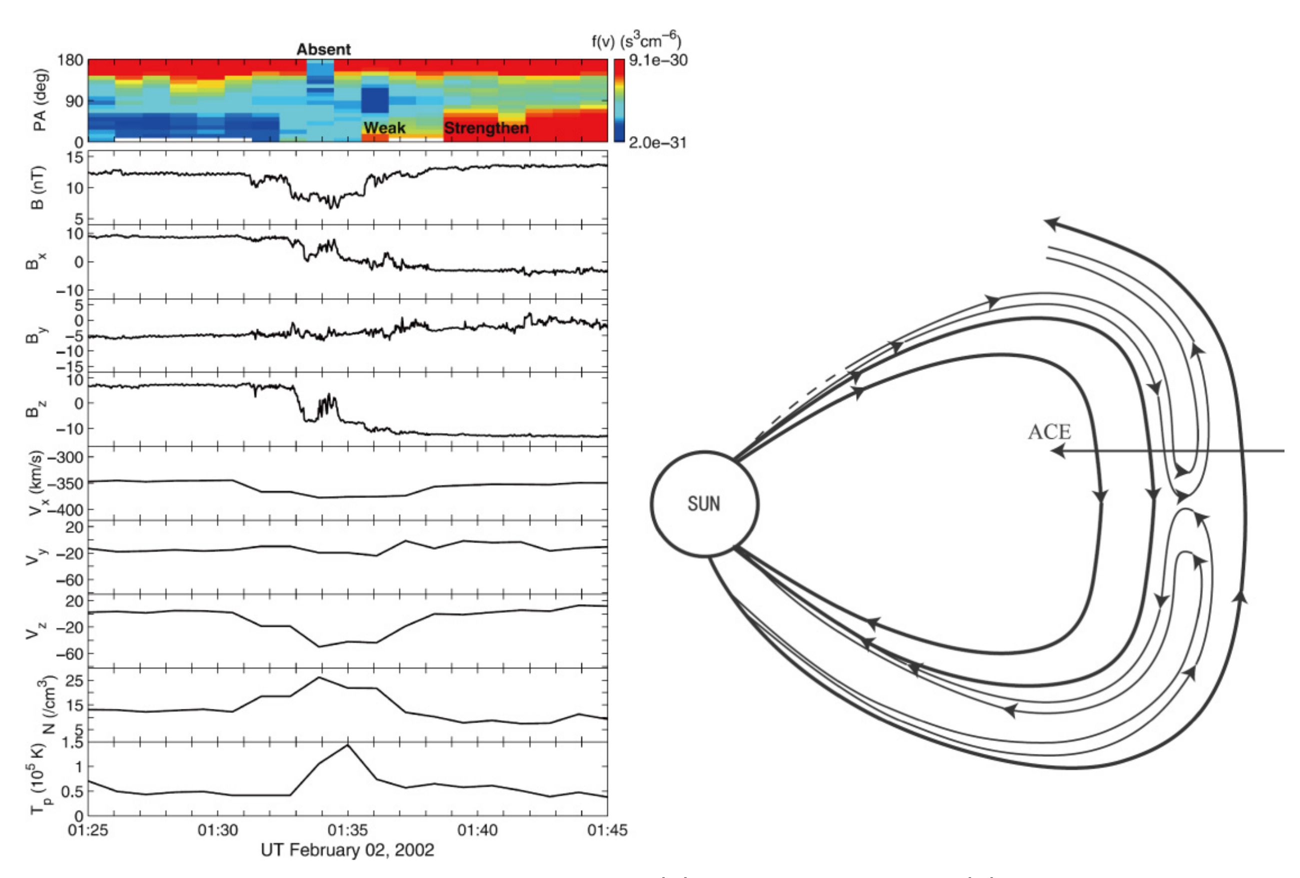


图 7　左: 2002年2月2日磁场重联事件[47]. 右: ACE卫星穿越磁云示意图[47].

Fig. 7　Left: the magnetic reconnection event observed by ACE on 2 February, 2002[47]. Right: illustration of MC traversed by ACE[47].

除了磁云作为大尺度磁通量绳结构在行星际空间传播过程中被剥蚀、封闭结构被打开、整个和太阳断开之外, 有观测显示本来磁云可能有多个子磁通量绳组成, 这些子结构在相互作用过程中可能由较小尺度的磁通量绳通过磁场重联合并成大尺度磁通量绳. 图10给出了Wind卫星在1998年3月25日到26日磁云期间对太阳风的观测数据. 从上到下依次为质子的磁场、密度、温度以及质子速度和等离子体β值[50]. 从3月25日的12:00 UT到3月26日09:50 UT (即阴影区域), Wind卫星遇到了具有相对强且平滑的磁场和低质子温度的区域(图10 (a)–(d)和(f)). 在大致相同的时间间隔内, 等离子体β值也非常低(大多数低于0.1, 图10 (j)), 并且超热电子束流也是双向的. 因此, 该阴影区间是一个典型的磁云, 且被很多文献的磁云列表收录[16]. 但是, 在3月25日的13:30 UT到3月26日09:30 UT期间, Wind卫星观测到z方向的磁场存在两个明显的双极变化(由图10 (d)底部的两个红色条表示). 在这个区间中, y方向磁场分量和总的磁场强度都在每个双极变化的中心达到最大值(图10 (a)、(c)). 这些都是典型的磁通量绳特征. 因此, Wind卫星在这个磁云内探测到两个行星际磁通量绳. 利用G-S重构方法可以确定这两个行星际磁通量绳的轴向. 图11 (a)和(c)给出了这两个行星际磁通量绳横截面, 图11 (b)和(d)分别给出了横向总压力作为A的函数的拟合曲线(A为垂直于轴平面内磁场对应的矢势), R_f是拟合方差值, 表示磁通量绳重构的质量, 通常都认为小于0.15重构结果较为可信. 如果将图11 (c)放大可以得到图11 (e), 由图11 (e)可以看出后者较大的磁通量绳是由图10 (d)中标识为FR2和FR3的两小磁通量绳相互作用合并而成. 由Wind卫星在1998年3月25–26日观测到的磁云可

以得到如下信息: 这个ICME可能在最初爆发的时候包含3个甚至更多的小磁通量绳, 并且它们之间过磁重联彼此合并. Wind在当地观测到的前两个磁通量绳的轴几乎在相反的方向上, 随着合并过程的进行, 两个磁通量绳将会并合成一个大尺度的中间磁场强度较弱的磁通量绳. 这样的磁通量绳在行星际空间经常被卫星观测到.

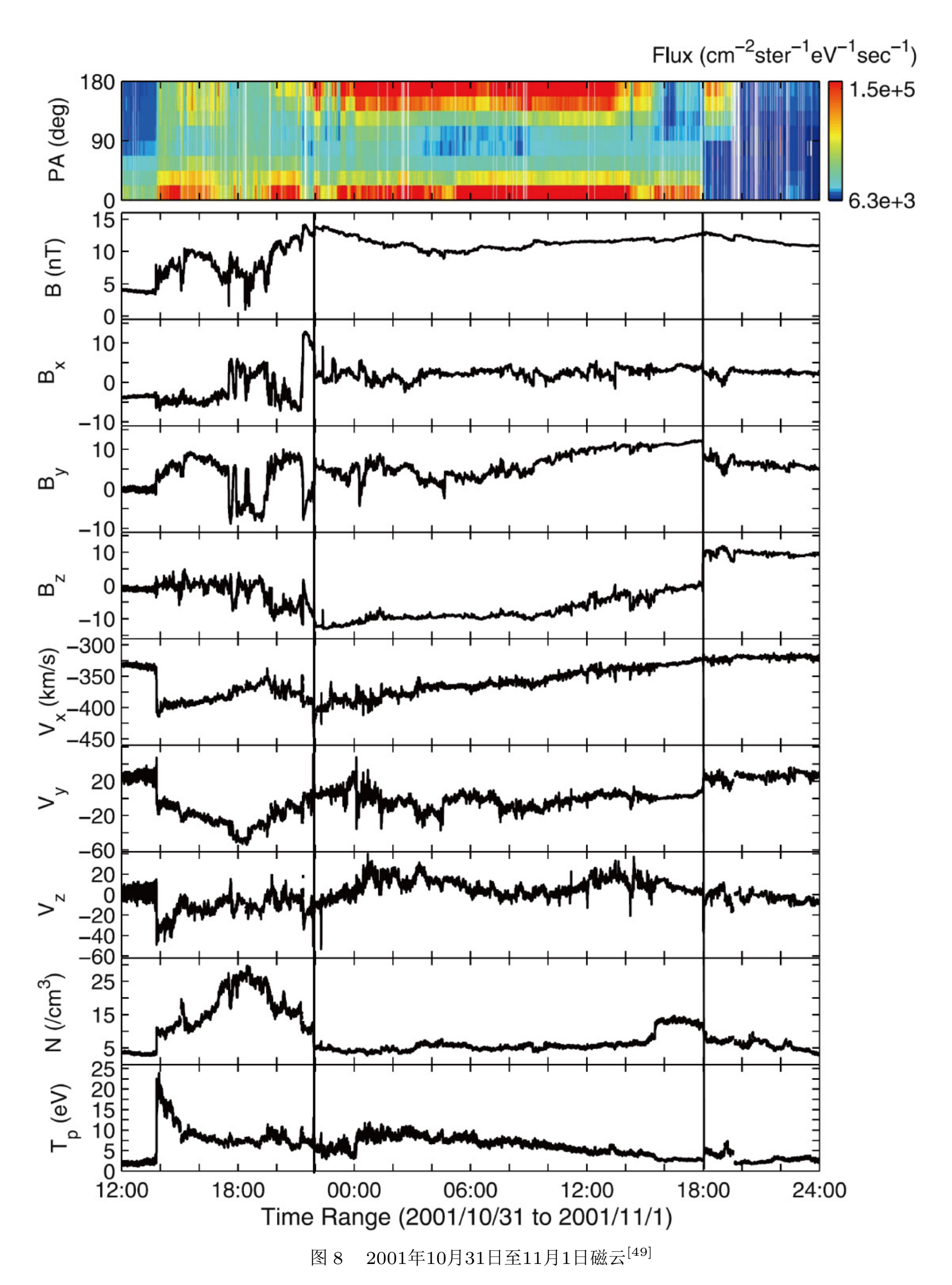


图 8 2001年10月31日至11月1日磁云[49]

Fig. 8 The magnetic cloud observed from 31 Oct to 1 Nov, 2001[49]

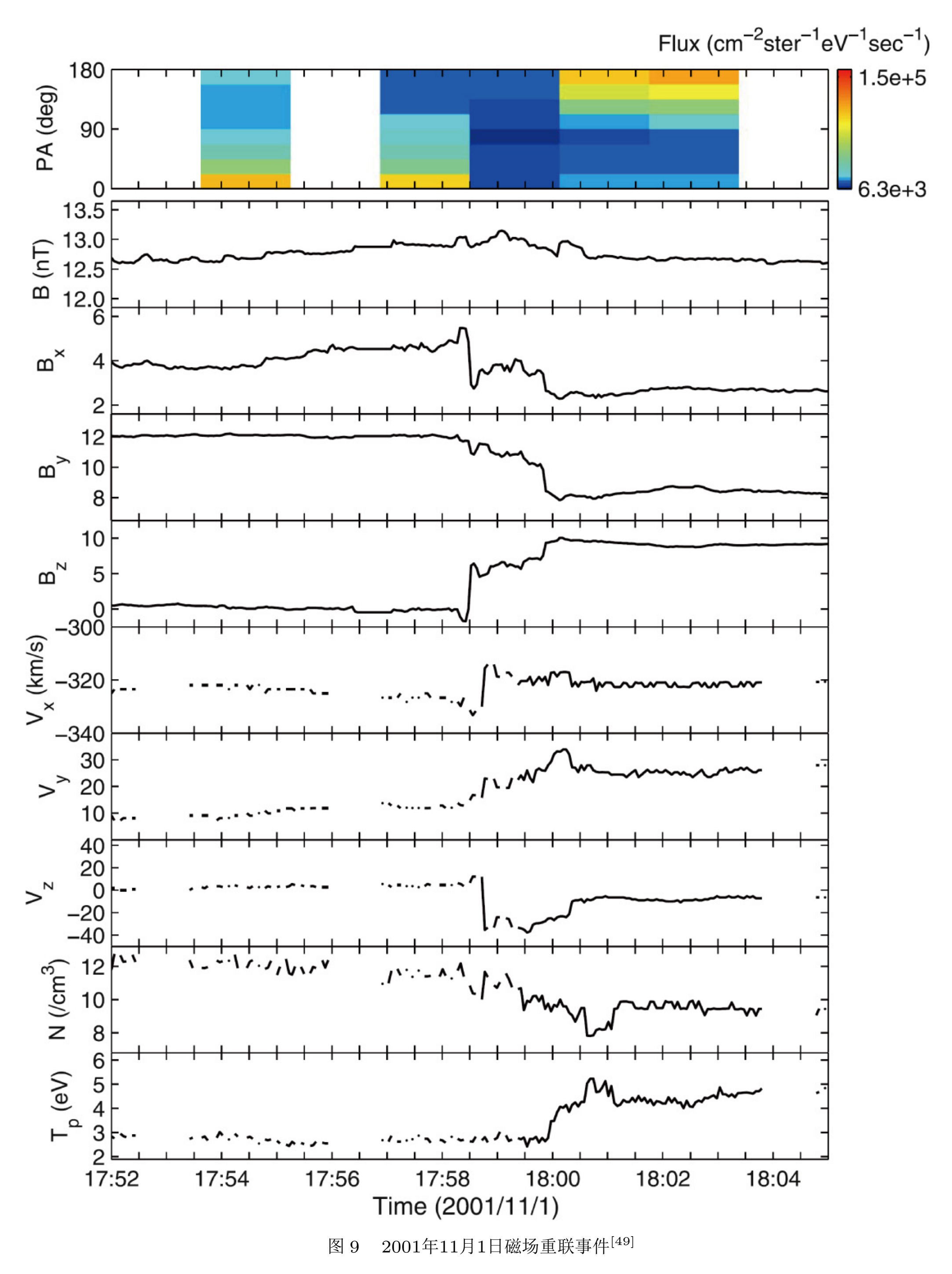


图 9　2001年11月1日磁场重联事件[49]

Fig. 9　The magnetic reconnection event detected on 1 Nov, 2001[49]

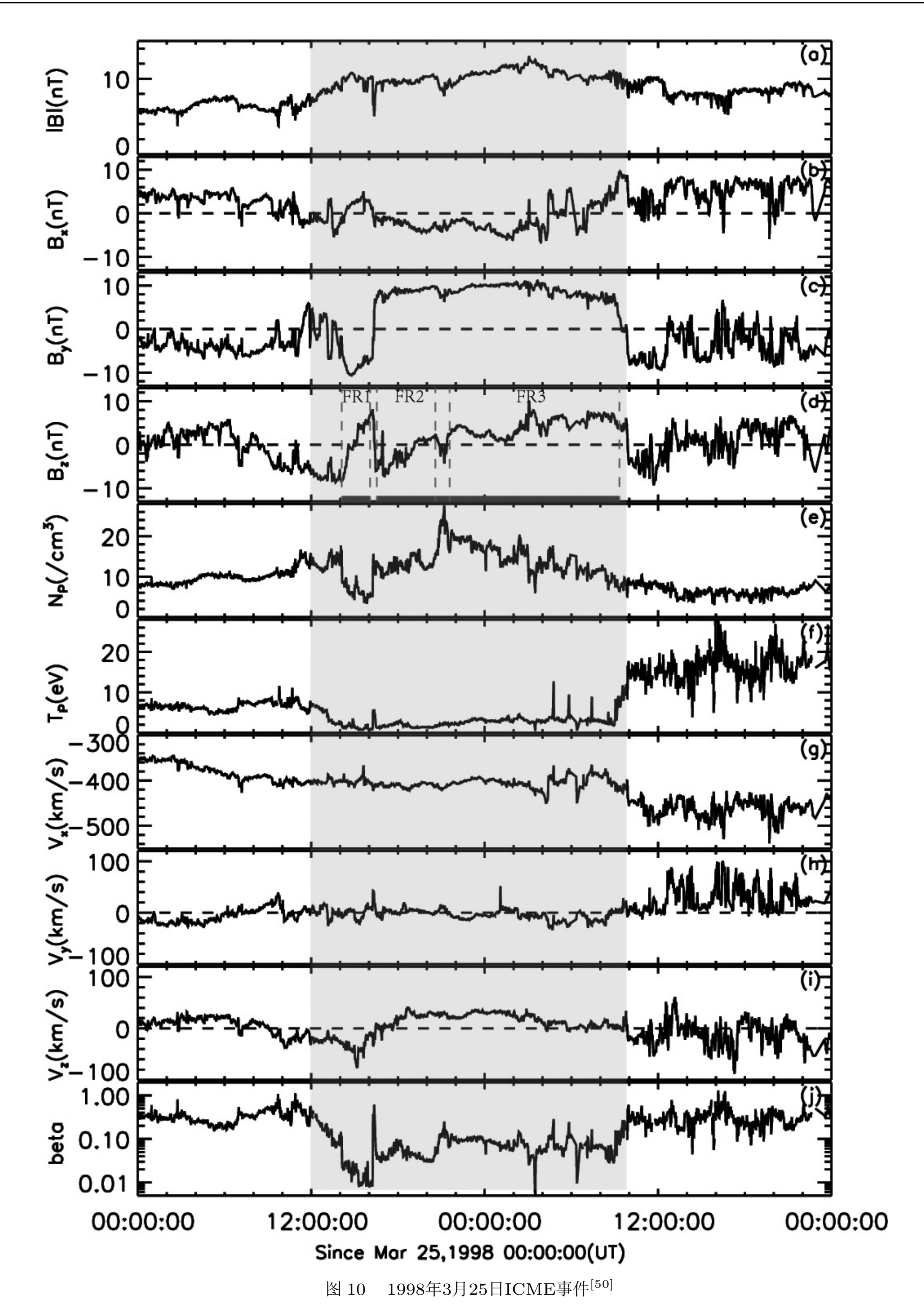


图 10 1998年3月25日ICME事件[50]

Fig. 10 The ICME detected on 25 Mar, 1998[50]

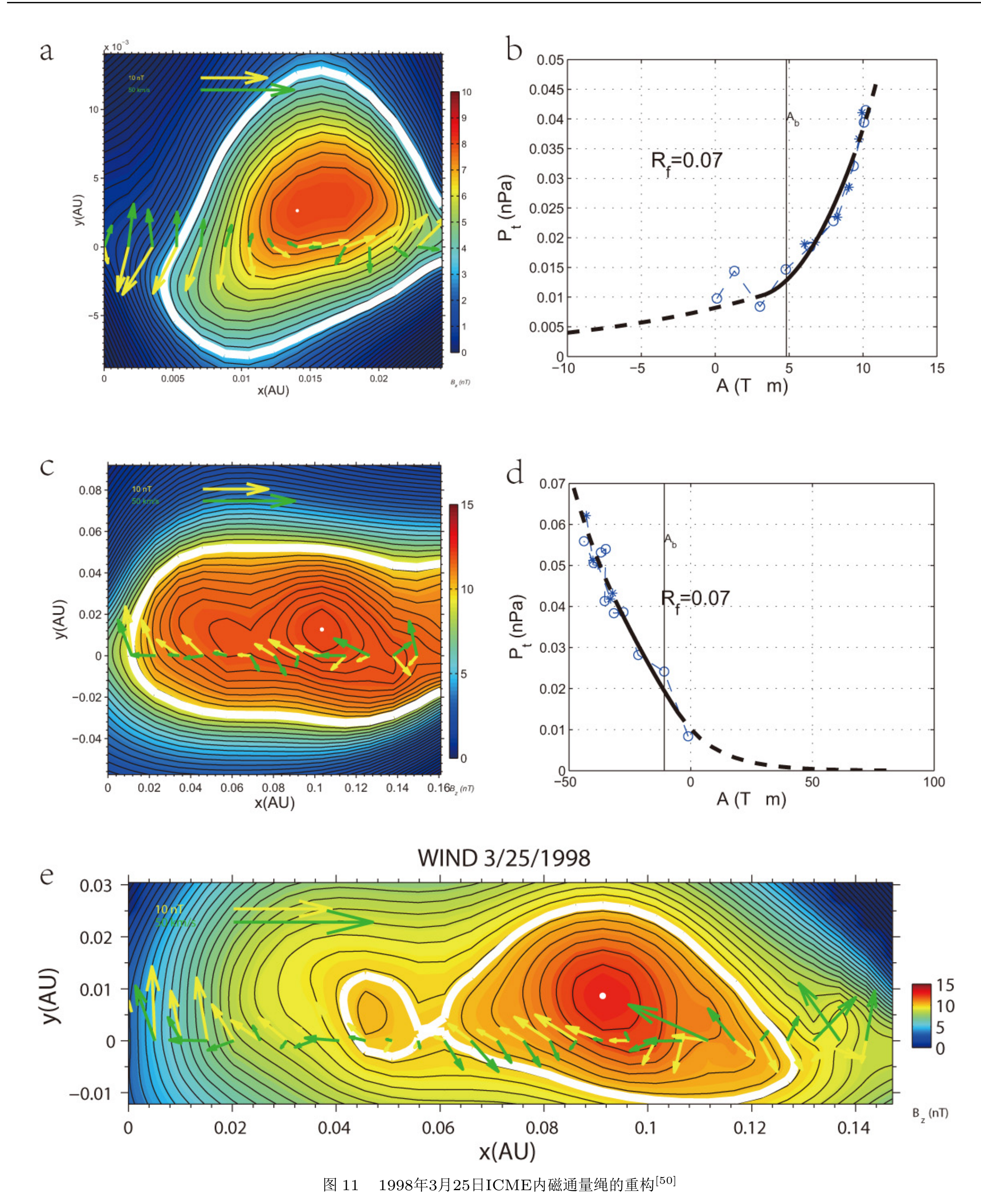


图 11　1998年3月25日ICME内磁通量绳的重构[50]

Fig. 11　Reconstruction of the magnetic flux ropes within ICME detected on 25 Mar, 1998[50]

5 讨论与展望

磁云在行星际空间的传播及其动力学演化是一个十分重要的课题, 这不仅关系到空间天气预报的可靠性, 也牵涉到磁云和非磁云ICME的关系. 前面提到, 当CME从太阳上被抛出时通常被认为具有封闭的磁通量绳结构. 然而, 在ICME中仅有约30%的事件具有磁通量绳结构. 那么是什么原因造成实地卫星穿过大部分ICME时没有探测到磁通量绳结构? 是否是磁云在演化过程中其磁通量绳结构被破坏掉了? 目前我们已经对磁云的动力学演化有了基本的了解, 但是对其演化的细节以及整个过程还不清楚, 还需要进一步深入研究. 如目前已经知道磁云会和背景太阳风通过磁场重联使边界位置发生变化, 形成发展演化的准静态边界层结构, 但是对磁场重联发生的条件并不完全清楚, 对磁场重联持续时间也不清楚. 如果磁场重联持续一段时间后暂时停滞, 再次启动磁场重联的机制也不清楚. 目前知道磁云边界处的磁场重联会对磁云的通量绳结构进行剥蚀, 但是磁云作为磁通量绳被剥蚀程度是如何随着传播距离发生变化的还不清楚. 剥蚀程度是基于二维模型估算的, 磁云则是一个三维大尺度磁通量结构, 局部的磁场重联是否能影响整个通量绳结构也不清楚. 虽然已经通过具体事例证明行星际磁场重联在磁通量绳和太阳磁场断开过程中起着一定作用, 但和太阳附近的磁场重联相比较, 哪个作用更大仍不清楚. 虽然观测揭示两个螺旋性和轴心磁场方向都相反的"子磁通量绳"可能会通过磁场重联合并成一个轴心磁场较弱、尺度较大的磁通量绳, 但这样的两个"子磁通量绳"通过磁场重联能合并到什么程度? 在合并过程中是否会由于轴心磁场强度的减少而引起整体的腊肠不稳定性造成整个通量绳系统崩溃等问题我们仍然不清楚. 而这可能是判断非磁云ICME是否可由内部的多个"子磁通量绳"相互作用形成的关键. 要想对磁云的行星际传播及其动力学演化进行全面了解, 并对相应的空间天气做有效预报, 这些问题都需要进行深入研究. 而这些问题的解决, 仅靠对目前卫星的实地探测数据的分析是不够的, 还需要借助于磁流体力学(magnetohydrodynamics, MHD)数值模拟研究磁云的传播及其动力学演化规律.

参考文献

[1] Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. JGRA, 1981, 86: 6673
[2] Chi Y T, Shen C L, Wang Y M, et al. SoPh, 2016, 291: 2419
[3] Cane H V, Richardson I G. JGRA, 2003, 108: 1156
[4] Canfield R C, Hudson H S, McKenzie D E. GeoRL, 1999, 26: 627
[5] Liu R, Liu C, Wang S, et al. ApJ, 2010, 725: L84
[6] Rust D M, Kumar A. ApJ, 1996, 464: L199
[7] Wang Y M, Zhang Q H, Liu J J, et al. JGRA, 2016, 121: 7423
[8] Wang Y M, Zhang J, Shen C L. JGRA, 2009, 114: A10104
[9] Shen F, Wu S T, Feng X S, et al. JGRA, 2012, 117: A11101
[10] Shen F, Yang Z C, Zhang J, et al. ApJ, 2018, 866: 18
[11] Cheng X, Guo Y, Ding M D. Science China Earth Sciences, 2017, 60: 1383
[12] Zhang Q H, Liu R, Wang Y M, et al. A&A, 2021, 647: A171
[13] Shen F, Liu Y S, Yang Y. ApJ, 2021, 915: 30
[14] Shen F, Liu Y S, Yang Y. ApJS, 2021, 253: 12
[15] Liu R. RAA, 2020, 20: 165
[16] Richardson I G, Cane H V. JGRA, 2004, 109: A09104
[17] Wu D J, Chao J K, Lepping R P. JGRA, 2000, 105: 12627
[18] Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. GeoRL, 2003, 30: 1700
[19] Zuo P B, Wei F S, Feng X S, et al. SoPh, 2007, 242: 167
[20] Zhang J, Temmer M, Gopalswamy N, et al. Progress in Earth and Planetary Science, 2021, 8: 56
[21] Shen C L, Chi Y T, Xu M J, et al. FrP, 2021, 9: 762488
[22] Song H Q, Zhang J, Cheng X, et al. ApJ, 2020, 901: L21
[23] Zhang J, Hess P, Poomvises W. SoPh, 2013, 284: 89
[24] Yashiro S, Gopalswamy N, Mäkelä P, et al. SoPh, 2013, 284: 5
[25] Kim R S, Gopalswamy N, Cho K S, et al. SoPh, 2013, 284: 77
[26] Gopalswamy N, Mäkelä P, Akiyama S, et al. SoPh, 2013, 284: 17
[27] 魏奉思, 刘睿, 范全林, 等. 中国科学(E辑), 2002, 32: 608
[28] Gosling J T, Skoug R M, McComas D J, et al. JGRA, 2005, 110: A01107
[29] Lavraud B, Ruffenach A, Rouillard A P, et al. JGRA, 2014, 119: 26
[30] Mao S D, He J S, Zhang L, et al. ApJ, 2017, 842: 109
[31] Feng H Q, Wang J M, Wu D J. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 1415
[32] Ruffenach A, Lavraud B, Owens M J, et al. JGRA, 2012, 117: A09101

[33] Feng H Q, Wu D J. ApJ, 2009, 705: 1385
[34] Ruffenach A, Lavraud B, Farrugia C J, et al. JGRA, 2015, 120: 43
[35] Zhao Y, Feng H, Liu Q, et al. JGR, 2021, 126: e28594
[36] Crooker N U, Forsyth R, Rees A, et al. JGRA, 2004, 109: A06110
[37] Hu Q, Sonnerup B U Ö. JGRA, 2002, 107: 1142
[38] Dasso S, Mandrini C H, Démoulin P, et al. A&A, 2006, 455: 349
[39] Shodhan S, Crooker N U, Kahler S W, et al. JGRA, 2000, 105: 27261
[40] McComas D J. RvGeo, 1995, 33: 603
[41] Gosling J T. RvGeo, 1975, 13: 1053
[42] Crooker N U, Gosling J T, Kahler S W. JGRA, 2002, 107: 1028
[43] Wang J M, Liu Q, Zhao Y. SoPh, 2018, 293: 116
[44] Baker D, Rouillard A P, van Driel-Gesztelyi L, et al. AnGeo, 2009, 27: 3883
[45] Lavraud B, Owens M J, Rouillard A P. SoPh, 2011, 270: 285
[46] DeForest C E, Howard T A, McComas D J. ApJ, 2012, 745: 36
[47] Wang J M, Feng H Q, Zhao G Q. ApJ, 2018, 853: 94
[48] Phan T D, Gosling J T, Davis M S, et al. Nature, 2006, 439: 175
[49] Feng H Q, Wang J M, Zhao G Q, et al. ApJ, 2018, 864: 101
[50] Feng H Q, Zhao Y, Zhao G Q, et al. GeoRL, 2019, 46: 5

Advance in Dynamics of Magnetic Cloud Evolution

FENG Heng-qiang ZHAO Yan WANG Jie-min
(Institute of Space Physics, Luoyang Normal University, Luoyang 471022)

Abstract Owing to its special magnetic structures, magnetic cloud (MC) is the main driver of disaster space weather. This paper deals with the research of MC on three aspects including boundary layer, azimuthal flux and large-scale structure. The boundary layer exists in the boundary of MC due to magnetic reconnection taking place there. Such reconnection could peel off the magnetic field of MC as it propagates, causing the reduction and imbalance in the azimuthal flux of its magnetic flux rope structure. Multiple flux ropes are often detected within MC. The coalescence of these flux ropes could change the large-scale structure of MC. In addition to exchange reconnection, magnetic reconnection taking place near the boundary of MC could also open the closed or half-closed magnetic field lines of MC. Although great progress has been made, many questions about the evolution of MC are still open. If MC could evolve into an interplanetary small magnetic flux rope due to the "peeling off" effect? Could the interaction of these sub-flux ropes within MC lead to collapse of the magnetic flux rope structure of MC? To answer these questions, further studies based on theory, observation and numerical simulation are needed.

Key words coronal mass ejections (CMEs), solar wind, magnetic reconnection